

УДК 661.74:669.14.046.554

А.А. Кулініч

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ЗАЛІЗА І КРЕМНІЮ НА ФОРМУВАННЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ І СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛИВАРНИХ СПЛАВІВ СИСТЕМИ Al–Mg–Zn**Вступ**

Домішки заліза і кремнію істотно знижують рівень механічних властивостей ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn, особливо пластичність [1–3]. Тому найбільша увага приділяється обмеженню вмісту даних домішок у сплавах, технології їх виробництва, можливості керування морфологією залізо- та кремнієвмісних фаз.

На склад та морфологію залізо- та кремнієвмісних фаз в алюмінієвих сплавах впливає як вміст заліза і кремнію в сплавах, так і співвідношення їх вмісту [1]. Зазначені фактори можуть істотно впливати на рівень механічних властивостей даних сплавів, і тому їх вплив на фазово-структурний склад і властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn потребують детального аналізу.

Постановка задачі

Мета даної статті – дослідити вплив домішок заліза і кремнію, введених як окремо, так і сумісно, на формування фазового складу, структуру та механічні властивості алюмінієвих ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn при різному вмісті магнію і цинку.

Методика досліджень

Об'єкт дослідження – ливарні сплави системи Al–Mg–Zn з вмістом магнію від 1 до 6 %, цинку – від 2 до 4 %. Вміст домішок заліза в досліджуваних сплавах змінювали від 0,1 до 1 %, кремнію – від 0,1 до 0,5 %.

У лабораторних умовах досліджували сплави виготовлялись сплавленням таких шихтових матеріалів: алюмінію марки А99, магнію марки Mg90, цинку марки ЦО, лігатури Al–5%Si, Al–5%Fe.

Дослідні плавки проводились в електричних печах опору типу СШОЛ з використанням графіто-шамотного тигля. В тиглі розплавлявся

алюміній, і при температурі $710 \pm 10^\circ\text{C}$ вводились цинк і магній. Дана температура є оптимальною з точки зору технологічної обробки розплаву досліджуваного сплаву [3–5]. Після розчинення цинку і магнію вводились лігатури із залізом та кремнієм і розплав витримувався при цій температурі протягом 15–20 хв. Після цього з поверхні розплаву видаляли шлаки і розливали його в металеву виливницю.

Отримані стандартні зразки діаметром 10 мм піддавались термічній обробці (відпалу, гартуванню та штучному старінню), і після цього визначались їх механічні властивості (тимчасовий опір розриву, межа текучості, відносне подовження).

Випробування механічних властивостей проводились на розривній машині TIRA-TEST за стандартними методиками.

Середні квадратичні відхилення значень механічних властивостей були такими: $\sigma_b - \pm 20$ МПа, $\sigma_{0,2} - \pm 10$ МПа, $\delta - \pm 15$ %.

Мікрорентгеноспектральний аналіз відбувався з використанням растрового електронного мікроскопа РЕММА-101А. Хімічний аналіз зразків досліджуваних сплавів проводили, використовуючи метод оптичної спектроскопії випарним розрядом.

Якісний та кількісний металографічний аналіз виконувався на мікроскопі NEOFOT-31. Рентгенографічне дослідження проводилось в Si-характеристичному випромінюванні із застосуванням дифрактометра ДРОН-413. Для вибору оптимального режиму термічної обробки досліджуваного сплаву використовувались дані термічного аналізу.

Експериментальна частина

На першому етапі досліджень на прикладі сплаву Al–6%Mg–2%Zn, що за своїм хімічним складом по вмісту магнію і цинку відповідає складу промислового сплаву ВАЛ11, було встановлено вплив домішок заліза вмістом до 1 % на структурно-фазовий склад та рівень механічних властивостей ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn. Вміст кремнію в даному сплаві не перевищував 0,1 %.

За результатами рентгеноспектрального аналізу фазовий склад досліджуваного сплаву з вмістом заліза від 0,1 до 1 % після лиття в металевий кокіль складається з α -твердого розчину магнію та цинку в алюмінії, нерівноважної евтектики $\alpha + T$ та голчастої фази FeAl_3 (рис. 1, а).

Фаза T має такий склад: (20–35) %Mg + (22–65) %Zn + Al.

Після відпалу за стандартним режимом (435 °C, 20 г) та гартування у воду структура сплаву складається з пересиченого α -твердого розчину заміщення магнію і цинку в алюмінії та виділень фази $FeAl_3$, форма і кількість яких майже не змінюються (рис. 1, б).

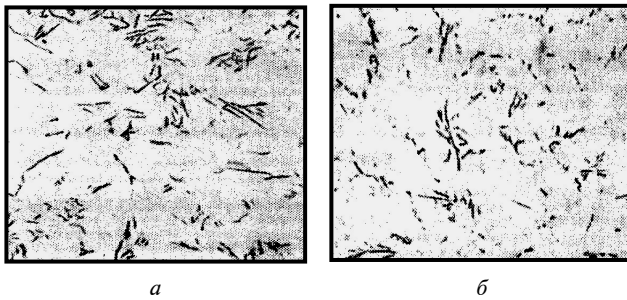


Рис. 1. Мікроструктура сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn–0,2 %Fe після лиття в кокиль (а) та гомогенізуючого відпалу з наступним гартуванням (б); а, б – $\times 100$

Кінцева структура сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn з вмістом заліза до 1 % після відпалу, гартування та штучного старіння має такий вигляд: α -твердий розчин магнію та цинку в алюмінії, інтерметалідна T -фаза ($Al_2Mg_3Zn_3$), що виділяється в середині та по границях зерен алюмінієвого твердого розчину і виділення фази $FeAl_3$ голчастої форми.

Залежність механічних властивостей сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn від вмісту домішок заліза після повної термічної обробки за стандартним режимом наведено на рис. 2. З даного рисунка видно, що при збільшенні вмісту заліза в досліджуваному сплаві від 0,1 до 1 % спостерігається значне зниження рівня механічних властивостей, особливо відносного подовження при розтягуванні. Так, при вмісті заліза 1 % значення відносного подовження в досліджуваному сплаві знижуються більше, ніж в два рази, порівняно із сплавом без домішок заліза (рис. 3, в).

На другому етапі досліджень встановлено вплив домішок кремнію вмістом до 0,5 % на фазовий склад, структуру та рівень механічних властивостей сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn. Вміст заліза в даному сплаві не перевищував 0,1 %.

За результатами рентгеноспектрального аналізу після лиття в металевий кокиль до фазового складу досліджуваного сплаву, що містить кремній до 0,5 %, входять первинні кристали фази Mg_2Si , які мають розгалужену морфологію (рис. 3, а).

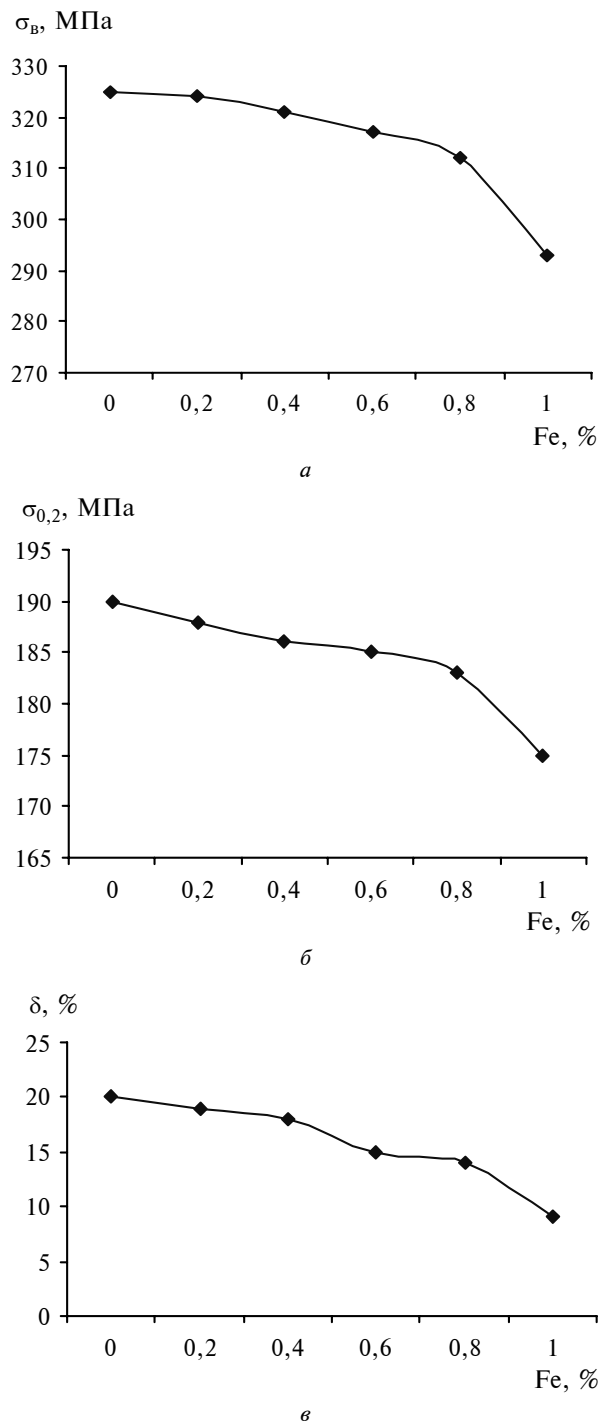


Рис. 2. Механічні властивості сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn з домішками заліза після термічної обробки (відпал: 435 °C, 20 г; гартування у воду: 80 °C, 8 г; штучне старіння: 190 °C, 2 г); а – тимчасовий опір розриву; б – межа текучості; в – відносне подовження

Після відпалу за стандартним режимом (435 °C, 20 г) та гартування у воду морфологія фази Mg_2Si майже не змінюється (рис. 3, б).

Дана фаза має форму “китайських ієрогліфів”, що в першу чергу істотно знижує пластичність ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn.

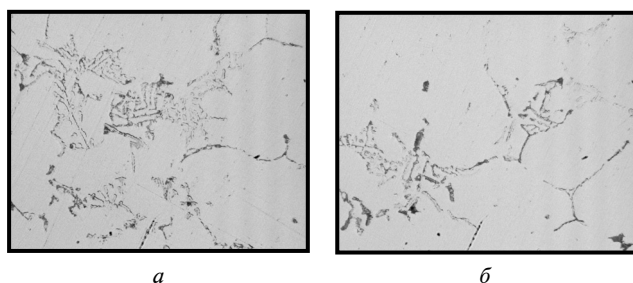


Рис. 3. Мікроструктура сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn–0,5 %Si після лиття в кокиль (а) та гомогенізуючого відпалу (435 °С, 20 г) і гартування у воду (б); $\times 500$

Кінцева структура сплаву Al–6 %Mg–2 % Zn з вмістом кремнію до 0,5 % після відпалу, гартування та штучного старіння така: α -твердий розчин магнію і цинку в алюмінії, інтерметалідна T -фаза ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$), що виділяється в середині та по границях зерен алюмінієвого твердого розчину, та виділення фази Mg_2Si з розгалуженою морфологією.

Залежність механічних властивостей сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn від вмісту домішок кремнію після повної термічної обробки за стандартним режимом наведено на рис. 4. З даного рисунка видно, що при збільшенні вмісту кремнію в сплав Al–6 %Mg–2 %Zn до 0,5 % спостерігається значне зниження рівня механічних властивостей, особливо відносного подовження. Так, при вмісті кремнію 0,5 % значення пластичності в досліджуваному сплаві знижуються майже в три рази порівняно із сплавом без домішок кремнію і в два рази порівняно із сплавом, в якому вміст кремнію дорівнює 0,3 %.

На третьому етапі досліджено вплив співвідношення вмісту домішок заліза і кремнію на склад та морфологію залізо- та кремнієвмісних фаз і рівень механічних властивостей ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn при різному вмісті магнію і цинку.

Сплав із вмістом магнію і цинку 6 і 2 % відповідав хімічному складу промислового сплаву ВАЛ11, 1,5 і 4 % – хімічному складу промислового сплаву АЛ24 і 1 і 4 % – експериментальному сплаву.

Для всіх сплавів дотримувались однакового співвідношення між вмістом заліза і кремнію (5 або 0,2 %) з метою більш чіткого виявлення впливу вмісту магнію і цинку на склад

та морфологію залізо- і кремнієвмісних фаз і рівень механічних властивостей сплавів. Результати досліджень наведено в таблиці.

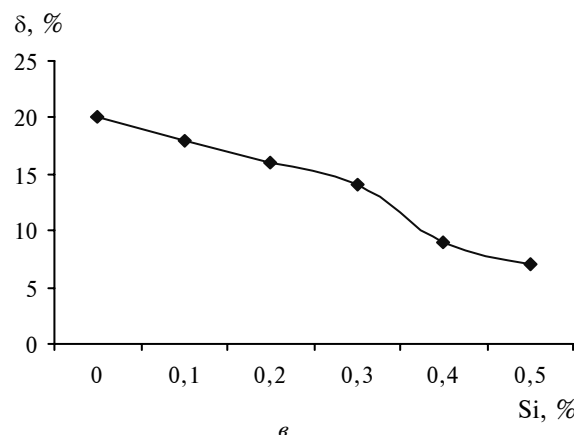
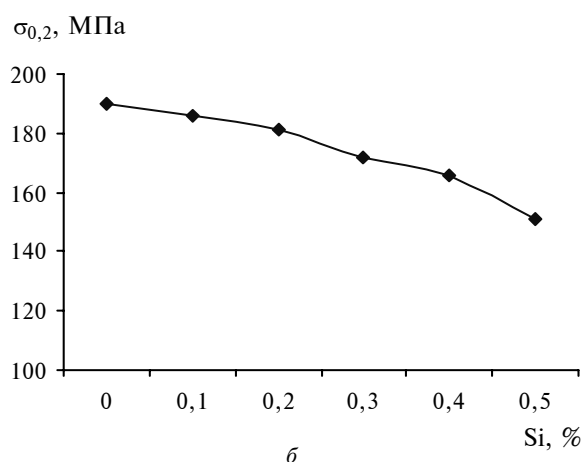
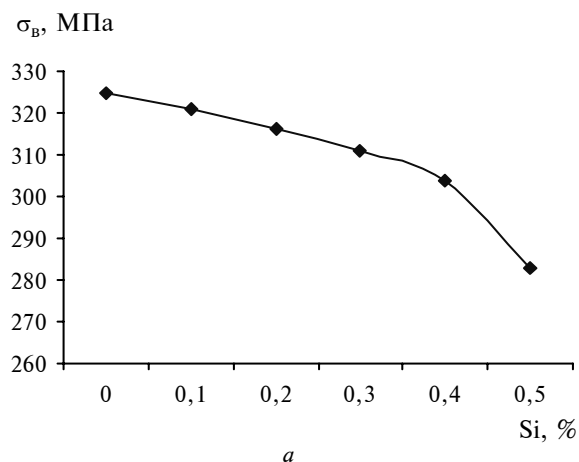


Рис. 4. Механічні властивості сплаву Al–6 %Mg–2 %Zn з домішками кремнію після термічної обробки (відпал: 435 °С, 20 г; гартування у воду: 80 °С, 8 г; штучне старіння: 190 °С, 2 г); а – тимчасовий опір розриву; б – межа текучості; в – відносне подовження

Таблиця. Вплив співвідношення головних та домішкових компонентів на фазовий склад та механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn

Хімічний масовий склад досліджуваних сплавів, %				Механічні властивості			Формула залізо- та кремнієвмісних фаз
Mg	Zn	Fe	Si	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	
6	2	0	0	325	190	20	—
6	2	0,1	0,5	280	148	6	FeAl ₃ , Mg ₂ Si
6	2	0,5	0,1	315	184	14	FeAl ₃ , Mg ₂ Si
1,5	4	0	0	270	164	7	—
1,5	4	0,1	0,5	240	139	5,5	FeAl ₃ , Mg ₂ Si
1,5	4	0,5	0,1	275	166	6,5	FeAl ₃ , Mg ₂ Si
1	4	0	0	260	160	7,5	—
1	4	0,1	0,5	232	136	6	Fe ₂ SiAl ₈
1	4	0,5	0,1	262	161	7,1	FeAl ₃ , Mg ₂ Si

Примітка. Механічні властивості сплавів: для сплавів Al–6%Mg–2%Zn–Fe–Si – після термічної обробки за режимом Т5; для інших сплавів – після лиття в кокіл та природного старіння протягом одного місяця.

З даної таблиці видно, що при вмісті магнію і цинку 6 і 2 % та 1,5 і 4 % незалежно від співвідношення вмісту заліза до кремнію утворюються дві залізо- та кремнієвмісні фази – FeAl₃ (рис. 5, а) і Mg₂Si (рис. 5, б). Таким чином, можна зробити висновок, що в промислових сплавах типу ВАЛ11 і АЛ24 при вмісті заліза і кремнію до 0,5 % можливе утворення тільки двох залізо- та кремнієвмісних фаз – FeAl₃ і Mg₂Si.

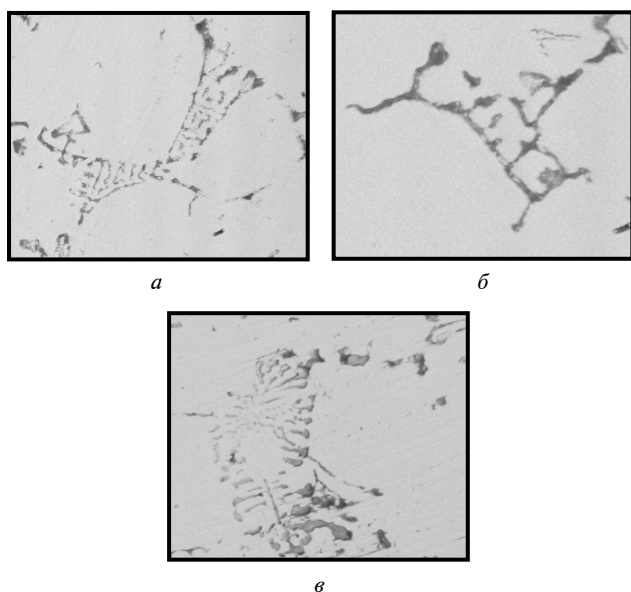


Рис. 5. Мікроструктура сплавів системи Al–Mg–Zn–Fe–Si після лиття в металеву виливницю; а – Al–6%Mg–2%Zn–0,5%Fe–0,1%Si; б – Al–1,5%Mg–4%Zn–0,1%Fe–0,5%Si; в – Al–1%Mg–4%Zn–0,1%Fe–0,5%Si; $\times 400$

Фаза Fe₂SiAl₈, морфологія якої є більш компактною, ніж у фази Mg₂Si, утворюється лише в сплаві Al–1%Mg–4%Zn–0,1%Fe–0,5%Si (рис. 5, в).

Подальші експериментальні дослідження дозволили встановити умови для утворення фази Fe₂SiAl₈ в ливарних сплавах системи Al–Mg–Zn, замість фаз FeAl₃ і Mg₂Si: а) по вмісту магнію – $Mg \leq 1\%$; б) по співвідношенню заліза до кремнію (в концентраційному інтервалі для заліза і кремнію від 0,1 до 0,5 % – $\%Si/\%Fe \geq 4$).

При виконанні двох зазначених умов одночасно в ливарних сплавах системи Al–Mg–Zn замість фаз FeAl₃ і Mg₂Si утворюється одна фаза Fe₂SiAl₈. Сама по собі фаза Fe₂SiAl₈ менш інтенсивно знижує рівень механічних властивостей досліджуваних сплавів (особливо відносно подовження), порівняно з фазами FeAl₃ і Mg₂Si, за рахунок більш компактної форми виділень, але зазначені умови, що сприяють її виникненню, не відповідають вимогам по хімічному складу, що висуваються до промислових сплавів (вміст магнію менше 1 %, вміст кремнію істотно перевищує вміст заліза). Зниження рівня механічних властивостей сплавів при вмісті в них магнію менше 1 % (особливо характеристик міцності) та перевищенні вмісту кремнію над залізом (характеристики пластичності) більш суттєве порівняно з перевагою, яку забезпечує утворення фази Fe₂SiAl₈ замість фаз FeAl₃ і Mg₂Si.

Висновки

У статті встановлено вплив домішок заліза вмістом від 0,1 до 1 % та кремнію від 0,1 до 0,5 %, введених як окремо, так і сумісно, на формування фазового складу, структури та механічні властивості алюмінієвих ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn з вмістом магнію від 1 до 6 % та цинку від 2 до 4 %.

При вмісті в досліджуваних сплавах магнію від 1,5 до 6 %, цинку від 2 до 4 %, заліза від 0,1 до 1 %, кремнію від 0,1 до 0,5 % утворюються дві залізо- та кремнієвмісні фази: FeAl₃ та Mg₂Si. При вмісті магнію в досліджуваних сплавах в межах 1–1,5 % замість зазначених фаз утворюється фаза Fe₂SiAl₈. Вплив зазначених домішок на рівень механічних властивостей досліджуваних сплавів має свої особ-

ливості: для сплавів з підвищеним вмістом магнію (6 %) домішки заліза і кремнію істотно знижують характеристики як міцності, так і пластичності; для сплавів з низьким вмістом магнію (1–1,5 %) домішки кремнію так само знижують характеристики як міцності, так і пластичності, а домішки заліза дещо підвищують характеристики міцності при незначному зниженні відносного подовження.

Термічна обробка за стандартним режимом майже не змінює морфологію фаз FeAl₃ і Mg₂Si. Тому для нейтралізації шкідливого впливу даних домішок потрібно застосовувати такі режими термічної обробки, які б впливали на зміну морфології залізо- та кремнієвмісних фаз, або застосовувати мікрелегування розплаву ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn.

А.А. Кулинич

ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗА И КРЕМНИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al–Mg–Zn

Установлено влияние примесей железа и кремния, введенных в расплав как отдельно, так и совместно, на формирование фазового состава, структуры и механические свойства литейных сплавов системы Al–Mg–Zn с разным содержанием магния и цинка. Показано, что кремний понижает механические свойства сплавов при любом содержании магния. Примеси железа понижают характеристики как прочности, так и пластичности исследуемых сплавов при повышенном содержании магния, а при пониженном содержании магния добавки железа до 0,5 % понижают только пластичность сплавов.

A.A. Kylinich

THE SPECIFICITY OF IRON AND SILICON INFLUENCE ON FORMING THE PHASE COMPOSITION, STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF CASTING ALLOYS OF SYSTEM Al–Mg–Zn

The study determines the influence of iron and silicon admixtures, infused both separately and jointly, on formation of the phase composition, structure and mechanical properties of casting alloys of the system of Al–Mg–Zn with various content of magnesium and zinc. The research results show that silicon lowers mechanical properties of alloys at any magnesium content, iron admixtures decrease durability and plasticity of alloys under study at high magnesium concentration, they also decrease the alloys plasticity by 0,5 at low magnesium concentration.

1. Мондольфо Л.Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
2. Постников Н.С. Упрочнение алюминиевых сплавов и отливок. – М.: Металлургия, 1963. – 120 с.
3. Кулініч А.А., Гаврилюк В.П., Рябініна О.О., Доній О.М. Фазово-структурний склад і механічні властивості сплаву Al–6%Mg–2%Zn–0,5%Fe–0,5%Si з добавками берилію після різних режимів відпау // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2007. – № 3. – С. 101–104.
4. Бялік О.М., Доній О.М., Кулініч А.А., Гзовський К.Ю. Механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn // Металознавство та обробка металів. – 2000. – № 4. – С. 70–73.
5. Бялік О.М., Доній О.М., Кулініч А.А. та ін. Вплив параметрів кристалування на структуру та механічні властивості ливарних сплавів системи Al–Mg–Zn // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2004. – 40, № 1. – С. 118–119.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
12 березня 2009 року